

EDN: QLPRYU

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76

Научная статья
УДК 697.953.2:631.22

Выбор потолочных вентиляторов в системе микроклимата животноводческих помещений

Алексей Васильевич Кузьмичев,

научный сотрудник,

e-mail: alkumkuzm@mail.ru;

Дмитрий Анатольевич Тихомиров,

член-корр. РАН, доктор технических наук,

главный научный сотрудник,

e-mail: tihda@mail.ru;

Алексей Викторович Хименко,

кандидат технических наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: avmkh87@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. На основе литературного анализа выявили, что распределение воздушных потоков и температуры внутри помещения зависит от нескольких основных факторов: особенностей конструкции здания, внешних климатических условий, внутренних источников теплоты и работы системы вентиляции. Показали, что в животноводческих зданиях возникает температурный градиент по высоте помещения, который может достигать 6 градусов Цельсия и более. Провели оценку возможного изменения температуры воздуха по высоте для различных животноводческих помещений. Установили, что применение потолочных вентиляторов позволит более равномерно распределять воздух, обеспечить нормативную скорость движения воздуха в рабочей зоне, снизить содержания вредных газов, микроорганизмов в местах нахождения животных. (*Цель исследования*) Разработать рекомендации по выбору потолочных вентиляторов в помещениях сельскохозяйственного назначения для выравнивания температуры воздуха по высоте и равномерного распределения приточного воздуха с учетом нормирования скорости движения воздушных масс в местах расположения животных. (*Материалы и методы*) Изучили возможные подходы и модели описания распространения компактных струй и приточных струй от осевых потолочных вентиляторов. (*Результаты и обсуждение*) Показали область возможного варьирования производительности потолочных вентиляторов при обеспечении нормативной подвижности воздушной среды в зоне нахождения животных в зависимости от высоты подвеса и диаметра лопастей вентилятора. Привели общие аналитические выражения для описания модели распространения компактных свободных и стесненных воздушных струй. Показан характер распространения компактных стесненных воздушных струй для помещений с наиболее характерной высотой зданий. (*Выводы*). Полученное аналитическое выражение связывает параметры потолочного вентилятора и характеристику воздушной струи с учетом нормативных значений скорости движения воздуха в рабочей зоне. Приведены расчетные зависимости и рекомендации по определению количества потолочных вентиляторов для выравнивания температуры воздуха по высоте помещения.

Ключевые слова: животноводство, микроклимат, вентиляция, комфортность, градиент температур, воздушная струя, потолочный вентилятор.

■ **Для цитирования:** Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Выбор потолочных вентиляторов в системе микроклимата животноводческих помещений. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №1. С. 69-76. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76. EDN: QLPRYU.

Scientific article

Selection of Ceiling Fans for the Microclimate System of Livestock Facilities

Alexey V. Kuzmichev,

researcher,

e-mail: alkumkuzm@mail.ru;

Dmitry A. Tikhomirov,

Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, chief researcher,

e-mail: tihda@mail.ru;

Aleksey V. Khimenko,

Ph.D.(Eng.), leading researcher,

e-mail: avmkh87@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. A literature review revealed that the distribution of air flows and indoor temperatures is influenced by several key factors, including building design, external climatic conditions, internal heat sources, and ventilation system operation. It was demonstrated that livestock buildings exhibit a temperature gradient along the room height, which can reach 6 degrees Celsius or more. An assessment of potential air temperature variations at different heights across various types of livestock facilities was conducted. It has been found that the use of ceiling fans enables a more uniform distribution of air, ensures the standard airflow velocity in the working area, and helps to reduce the concentration of harmful gases and microorganisms in animal zones. *(Research purpose)* The study aims to develop recommendations for selecting ceiling fans in agricultural premises to equalize air temperature at different heights and ensure uniform distribution of supply air, while maintaining regulated air flow velocity in animal housing areas. *(Materials and methods)* Various approaches and models for describing the propagation of compact jets and supply air jets from axial ceiling fans were analyzed. *(Results and discussion)* The range of possible variations in the ceiling fan performance was determined ensuring the normative air velocity in the animal zone, depending on suspension height and blade diameter. General analytical expressions were presented for modeling the propagation of both free and confined compact air jets. Additionally, the behavior of confined compact air jets in buildings with typical height characteristics was analyzed. *(Conclusions)* The obtained analytical expression defines the relationship between ceiling fan parameters and air flow characteristics, considering the regulated air flow velocity in the working zone. Calculated dependencies and recommendations were provided for determining the optimal number of ceiling fans needed to equalize the air temperature along the room height.

Keywords: livestock farming, microclimate, ventilation, comfort, temperature gradient, air jet, ceiling fan.

■ **For citation:** Kuzmichev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Selection of ceiling fans for the microclimate system of livestock facilities. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 69-76 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76. EDN: QLPRYU.

Применение на животноводческих предприятиях энергетического оборудования различного типа, в том числе отопительного, и высокая концентрация животных, также являющихся источником теплоты, приводят к возникновению градиента температуры воздушной среды по высоте помещения. Теплый воздух, поднимаясь вверх, под потолком образует воздушную подушку, а холодный и излишне влажный воздух скапливается внизу на уровне рабочей зоны, где располагаются животные и обслуживающий персонал. Перепад температуры может достигать 6 °C и более, при этом в рабочей зоне температура значительно ниже (особенно в холодный период года), чем предусмотрена нормами по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота (РД-АПК 1.10.01.01-18).

Наиболее нагретая часть помещения для коров с вентиляцией у конька здания находится под крышей [1]. В системах общеобменной приточно-вытяжной вентиляции не всегда равномерно распределяются поступающие воздушные массы по объему помещения. Установка потолочных вентиляторов позволит обеспечить в рабочих зонах требуемую скорость воздуха, выровнять температуру по высоте помещения [2].

Экспериментальные исследования отопительно-вентиляционной системы с потолочными вентиляторами в зимний период в профилактории для телят показали уменьшение времени разогрева и остывания воздуха, снижение расхода энергии на отопление [3]. Может быть снижена мощность или изменены режимы работы отопительной установки [4].

Вместе с тем требуется научное обоснование выбора параметров потолочных вентиляторов, их высоты подвеса, конструктивных особенностей, необходимого количества, взаимного расположения в помещении.

Цель исследования – разработать рекомендации по выбору потолочных вентиляторов для выравнивания температуры воздуха по высоте помещения и распределения воздуха с учетом нормирования скорости движения воздушных масс в местах расположения животных.

Материалы и методы. В животноводческих помещениях объем воздуха непрерывно циркулирует. Характер распространения воздушных потоков, распределение температуры внутри помещения зависят от конструктивной схемы системы вентиляции, определяющей температуру и скорость поступающего воздуха, внешних климатических факторов, наличия тепловыделяющих источников, а также работы приточно-вытяжной вентиляции и технологического оборудования [1, 2, 5]. Задача заключается в анализе характера движения воздушных масс с тем, чтобы в зонах с животными обеспечить требуемые параметры микроклимата – температуру и скорость воздуха [8].

Методы определения температуры воздушной среды основаны на формуле линейного возрастания температуры по высоте H помещения:

$$t_{\text{пом}} = t_{\text{р.з}} + \gamma \cdot (H - h_{\text{р.з}}), \quad (1)$$

где $t_{\text{р.з}}$ – температура в рабочей зоне (на высоте $h_{\text{р.з}}$ от пола), °C; γ – увеличение (градиент) температуры на каждый метр выше рабочей зоны ($h_{\text{р.з}}$), °C/м.

Для производственных и бытовых помещений $h_{p.з} = 2$ м; для помещений с небольшим тепловыделением принимают $\gamma = 0,5^\circ\text{C}/\text{м}$, с интенсивным – $\gamma = 0,7-1,5^\circ\text{C}/\text{м}$.

Рабочая зона определяется видом, возрастом, местом расположения животных и нахождения обслуживающего персонала (рис. 1).

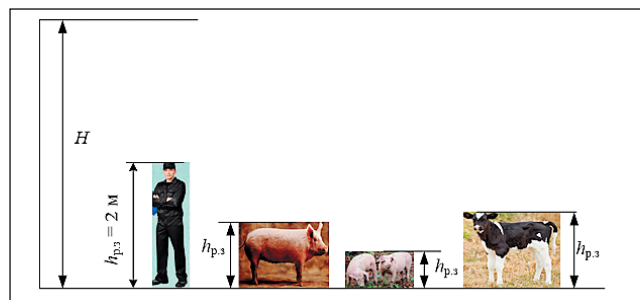


Рис. 1. Варьирование величины рабочей зоны ($h_{p.з}$) в производственных помещениях

Fig. 1. The value (height) of working area of the production premises

На рисунке 2 приведена зависимость изменения температуры воздуха от высоты помещения и интенсивности тепловыделения для рабочей зоны на высоте $h_{p.з} = 0,5$ м при температуре воздуха $t_p = 18^\circ\text{C}$, соответствующей тепловому комфорту животных, и $\gamma = 0,5-1,5^\circ\text{C}/\text{м}$ [7, 8].

Выравнивание температуры достигается путем организации обмена воздуха при подаче приточной струи из верхней зоны помещения в рабочую. Применение потолочных вентиляторов является эффективным методом выравнивания температуры по высоте помещения [9-11].

Современные методы расчета приточных струй основаны на трудах Абрамовича Г.Н., Гримитлина М.И., Талиева В.Н., Шепелева И.А., Сазонова Э.В. и др. На основании экспериментальных и теоретических исследований получены обобщенные характеристики компактных струй, образующихся из круглых, квадратных и прямоугольных отверстий. Схожие характеристики распространения приточных струй имеют осевые вентиляторы.

В качестве модели для описания работы потолочного вентилятора примем рассмотрение приточной струи, истекающей из круглого отверстия. Существующая методика расчета приточных струй предполагает, что струя состоит из двух участков. Начальный участок (устье струи), примыкающий к приточному отверстию, характеризуется наличием ядра постоянной скорости. Основной участок состоит из пограничного слоя, где скорость в любой точке меньше скорости истечения. Струя истекает с равномерной скоростью v_0 , при этом осевая скорость в пределах начального участка x_0 постоянна и равна скорости истечения v_0 .

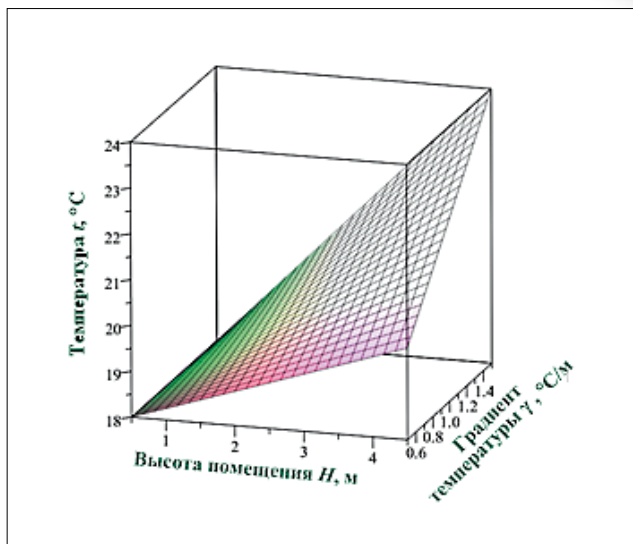


Рис. 2. Изменение температуры воздуха по высоте помещения

Fig. 2. Change in air temperature along the height of the room

На основном участке осевая скорость изотермической струи представляется в виде:

$$v_x = \frac{v_0 \sqrt{F_0}}{\sqrt{\pi c x}}, \quad (2)$$

где v_0 – начальная скорость истечения по оси x , м/с; F_0 – площадь приточного отверстия при истечении воздушной струи, м^2 ; $c = 0,082$ – значение экспериментальной постоянной; x – расстояние от начала истечения струи на основном участке (при условии $x > x_0$), м.

Для струи, истекающей из круглого отверстия радиусом R_0 :

$$v_x = v_0 R_0 / c x. \quad (3)$$

Обобщенная расчетная формула, отражающая непрерывное изменение осевой скорости на всем пути развития струи, имеет вид:

$$v_x = v_0 \sqrt{1 - e^{-(R_0/cx)^2}}. \quad (4)$$

Закономерности распределения скорости в зоне перемешивания струи описываются большим числом аналитических выражений, основанных на полумпирических теориях. Одно из них имеет экспоненциальный закон распределения:

$$u = v_x e^{-\frac{(r/cx)^2}{2}}, \quad (5)$$

где u – скорость движения воздуха в произвольной точке струи с координатами x и r (рис. 3); r – расстояние от оси струи по координате x ; v_x – скорость воздуха в центре произвольного поперечного сечения струи.

Скорость в любой точке струи с координатами x и r на основном участке

$$u = v_0 \sqrt{1 - e^{-(R_0/cx)^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{cx} \right)^2}. \quad (6)$$

Приведенные соотношения представляют аналитическое описание распространения затопленной нестесненной струи в пространстве.

Две одинаковые приточные струи, распространяющиеся по одной прямой навстречу друг другу, взаимодействуют таким образом, что струя вначале распространяется как свободная, затем тормозится другой струей и растекается по плоскости, перпендикулярной оси обеих струй, разделяющих расстояние между приточными отверстиями пополам. Задача о взаимодействии двух одинаковых струй идентична задаче о взаимодействии одной струи и непроницаемой для воздуха твердой поверхности, находящейся в плоскости симметрии обеих струй (рис. 3).

Скорость на оси струи, соответствующей рассматриваемому условию:

$$u_{x \text{ пл.огр}} = u \sqrt{\frac{1 - \frac{x}{a}}{1 - \frac{x}{2a}}} \quad (7)$$

где a – расстояние от устья струи до нижней непроницаемой поверхности (пола).

Случай взаимодействия двух одинаковых компактных прямооточных струй, истекающих в одном направлении из двух отверстий, центры которых расположены на некотором расстоянии, приведен на рисунке 4 (где D_0 – диаметр приточного отверстия; b – расстояние между центрами приточных отверстий или до ограничивающей плоскости).

Скорость движения воздуха в произвольной точке пространства, в котором распространяются одинаковые струи, имеет вид:

$$u = v_0 \sqrt{1 - e^{-(R_0/cx)^2}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{r}{cx})^2} \sqrt{e^{(\frac{y-b}{cx})^2} + e^{(\frac{y+b}{cx})^2}}. \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Основным требованием к технологическому оборудованию ферм является создание комфортных условий в зонах размещения животных. Важная задача заключается в выравнивании температуры по высоте помещения при ограниченной подвижности воздушной среды в рабочих зонах, а также в поддержании состава воздушно-газовой среды в соответствии с зоогигиеническими требованиями. Нормы скорости движения воздуха в сельскохозяйственных производственных помещениях (РД-АПК 1.10.01-18) приведены в таблице 1.

Характер циркуляции воздушных потоков, создаваемых потолочными вентиляторами, должен отвечать этим требованиям и определяется высотой помещения, высотой подвески вентилятора от потолка, местом установки, числом вентиляторов и их техническими характеристиками.

Высота рабочей зоны ($h_{p.з}$ – зона обитания животных, м) и подвижность воздушной среды зависят от назначения помещения и регламентируются нормами технологического проектирования.

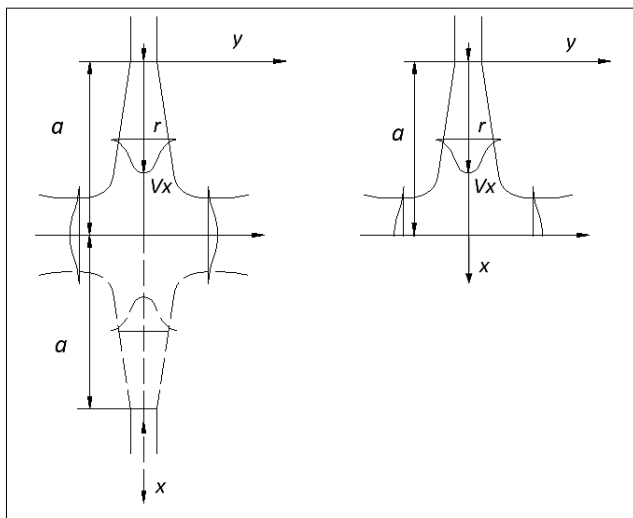


Рис. 3. Взаимодействие двух встречных приточных струй или приточной струи с плоскостью, перпендикулярной потоку

Fig. 3. Interaction of two counter supply air jets or a supply air jet with a plane perpendicular to the flow

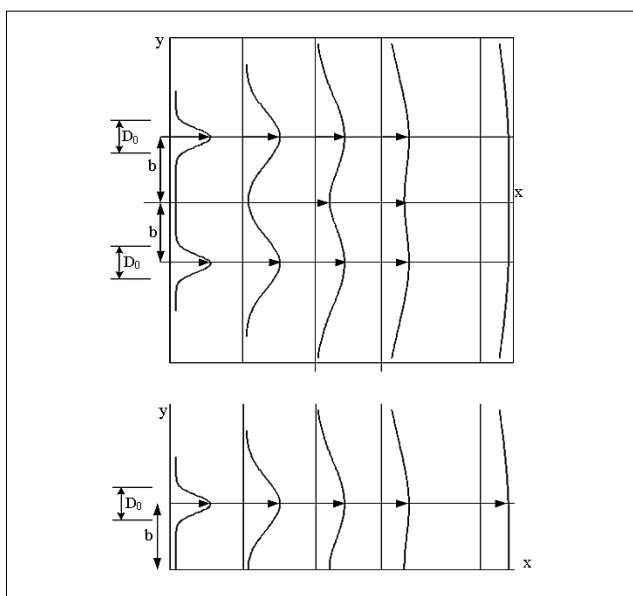


Рис. 4. Профили скоростей при взаимодействии двух одинаковых параллельных приточных струй или приточной струи с плоскостью, параллельной потоку

Fig. 4. Velocity profiles during the interaction of two identical parallel supply air jets or a supply jet air with a plane parallel to the flow

Исходя из этого, скорость воздуха струи, создаваемая осевым вентилятором, на верхней границе рабочей зоны не должна превышать некоторого максимального значения $u_{\text{макс}} \geq u_{x \text{ пл.огр}}$

$$u_{\text{макс}} \geq u_{x \text{ пл.огр}} = u k_c, \quad (9)$$

где $k_c = \frac{\sqrt{1 - \frac{a - h_{p.з}}{a}}}{1 - \frac{a - h_{p.з}}{2a}}$ – коэффициент стеснения струи.

Аналитическая зависимость характеристики струи с техническими параметрами потолочного вентилятора

$$\frac{L_B}{\sqrt{F_B}} = \frac{u_{\max}(a - h_{p.з}) \cdot (1 - \frac{a - h_{p.з}}{2a})}{6,88 \sqrt{1 - \frac{a - h_{p.з}}{a}}}, \quad (10)$$

где L_B – производительность потолочного вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$; $F_B = (\pi D_B^2)/4$ – площадь круга, описываемого лопастями вентилятора, м^2 ; D_B – диаметр вентилятора, м .

В таблице 2 приведены расчетные значения производительности потолочного вентилятора L_B ($\text{м}^3/\text{с}$) при диаметре рабочих лопастей $D_B = 0,9 \text{ м}$ в зависимости от высоты рабочей зоны $h_{p.з}$, высоты подвеса вентилятора от пола $h_{\text{вент}}$ и допустимой скорости движения воздуха в рабочей зоне.

На рисунке 5 показана область, ограниченная графиками 1 и 2, возможного варьирования производительности потолочных вентиляторов, обеспечивающих требуемую подвижность воздушной среды в установленных рабочих зонах, в зависимости от высоты подвеса и диаметра рабочих лопастей вентилятора. График 1 соответствует скорости воздуха $u_{\max} = 1 \text{ м/с}$ в рабочей зоне $h_{p.з} = 1 \text{ м}$; график 2 – $u_{\max} = 0,5 \text{ м/с}$ в рабочей зоне $h_{p.з} = 0,5 \text{ м}$.

На рисунке 6 показаны профили скоростей движения воздуха параллельных струй (рис. 6а) и профили скоростей движения воздуха параллельных струй в условиях их взаимодействия с учетом стеснения струи поверхностью zy (пол) (рис. 6б).

Расстояние, в пределах которого взаимодействующие параллельные струи могут рассматриваться

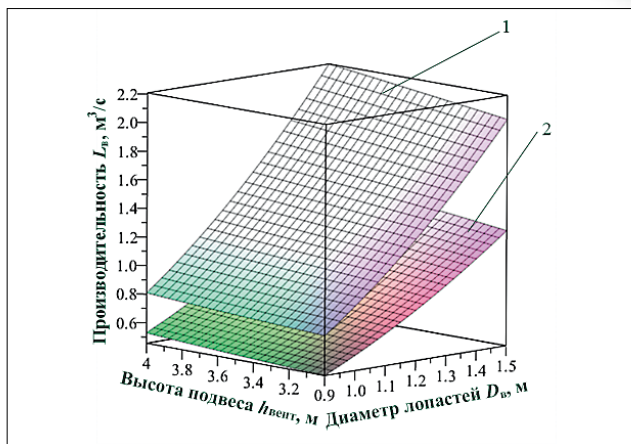


Рис. 5. Область возможного варьирования производительности потолочных вентиляторов в зависимости от высоты подвеса и диаметра рабочих лопастей

Fig. 5. The range of possible variations in ceiling fan performance depending on suspension height and working blade diameter

как свободные, оценивается соотношением $a = 26,8b$ с погрешностью $\lambda = 0,1$. При условии, что $b > D_B = 0,9-1,5$ предельное расстояние находится в диапазоне $a = 24,1-40,2 \text{ м}$. Для большинства сельскохозяйственных зданий высота потолков не превышает 6 м .

Производство сельскохозяйственной продукции – это совокупность взаимодействующих технологических процессов и технических элементов, представляющих собой единую биотехническую систему (животное – среда – технические элементы [12]. Для сельскохозяйственных ферм создание требуемых условий микроклимата в пространстве

Таблица 1

Нормы скорости движения воздуха в сельскохозяйственных помещениях
AIR VELOCITY STANDARDS IN AGRICULTURAL PREMISES

Table 1

Назначение помещения	Скорость воздуха, м/с	
	оптимальная	максимальная
Помещения для молодняка и скота на откорме	0,5	1
Родильное отделение с профилакторием телятника, доильное отделение, манеж	0,3	0,5
Свинарники	Расчетная в холодный и переходный периоды	Допустимая в летний период
Для холостых и легкосупоросных маток и хряков-производителей	0,3	1
Для ремонтного молодняка и порослят-отъемышей	0,2	0,6
Откормочники	0,3	1
Маточники для тяжелосупоросных маток и подсосных с приплодом	0,15	0,4

Таблица 2

Показатели подвижности воздушной среды в рабочей зоне при применении потолочного вентилятора
INDICATORS OF AIR MOVEMENT IN THE WORKING AREA WHEN USING A CEILING FAN

Table 2

Высота рабочей зоны $h_{p.з}$, м	0,5				1			
Высота подвеса вентилятора $h_{\text{вент}}$, м	4		3		4		3	
Скорость движения воздуха в рабочей зоне, м/с	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Производительность вентилятора, L_B , $\text{м}^3/\text{с}$	0,53	1,1	0,46	0,91	0,40	0,81	0,37	0,73

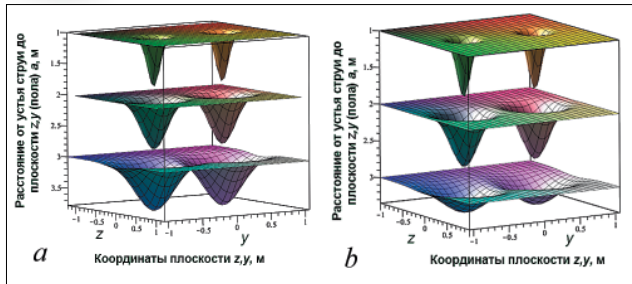


Рис. 6. Профили скоростей движения воздуха параллельных струй в условиях их взаимодействия

Fig. 6. Air velocity profiles of parallel jets under interaction conditions

помещения является одной из приоритетных задач [13, 14]. Поскольку сами помещения для содержания животных существенно различаются по техническим средствам (конструктивным элементам), то важно создать единый методологический подход к выбору параметров потолочных вентиляторов, их количеству и размещению, которые обеспечивают требуемые параметры микроклимата в рабочих зонах обитания животных, а также обслуживающего персонала [15, 16].

Микроклимат животноводческих помещений определяется комплексом физических параметров: влажность, температура, скорость перемещения воздуха, концентрация вредных газов и микроорганизмов, запыленность. Поддержание определенного воздухообмена с внешней средой позволяет создать требуемые условия микроклимата.

В зависимости от приоритета выполняемой задачи необходимое качество воздушной среды обеспечивается за счет подачи в помещение с учетом его назначения и режима эксплуатации определенного количества наружного воздуха. Воздухообмен определяется на основе удельных норм и кратности, обеспечения допустимых концентраций вредных веществ и удаления вредных примесей.

Выбор необходимого количества потолочных вентиляторов проводится по формуле:

$$N_n = V/L_v, \quad (11)$$

где V – кратность воздухообмена, $\text{м}^3/\text{ч}$; L_v – производительность одного вентилятора, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Необходимая мощность вентилятора может быть приближенно определена по выражению:

$$P_v = 1,2V\Delta T, \quad (12)$$

где V – объем помещения, м^3 ; ΔT – установленная разница между температурой воздуха у потолка и у пола, $^\circ\text{C}$; 1,2–1,3 – коэффициент, учитывающий потери теплоты в помещении, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

Для помещений с интенсивным выделением и высокой концентрацией вредных примесей, распределенных по всей поверхности и объему поме-

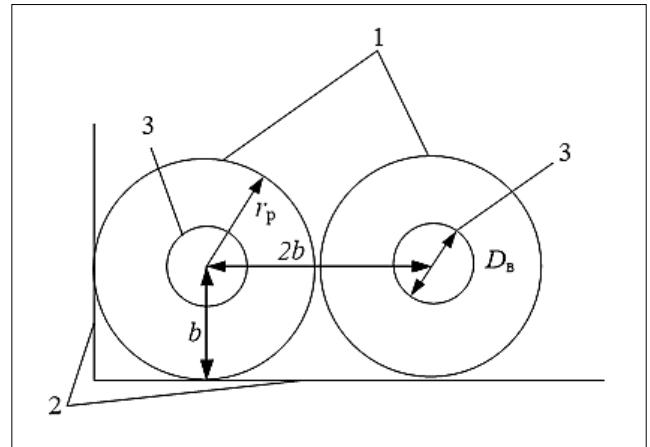


Рис. 7. Схема размещения потолочных вентиляторов

Fig. 7. Ceiling fan placement diagram

щения, выбор достаточного количества потолочных вентиляторов проводится по соотношениям:

$$N_d = S/4r_p^2,$$

$$r_p^2 = -2[0,082(h_{\text{вент}} - h_{p.з})]^2 \cdot \ln \frac{\varepsilon(h_{\text{вент}} - h_{p.з})\sqrt{F_0}}{6,88Lk_c} \quad (13)$$

$$k_c = \sqrt{\frac{1 - \frac{h_{\text{вент}} - h_{p.з}}{h_{\text{вент}}}}{1 - \frac{h_{\text{вент}} - h_{p.з}}{2h_{\text{вент}}}}},$$

где S – площадь помещения, м^2 ; r_p – граница расширения струи, м ; $h_{\text{вент}}$ – высота подвеса вентилятора, м ; $h_{p.з}$ – высота рабочей зоны, м ; ε – величина, задающая минимальное значение скорости на боковой границе струи $u_{\text{стр}} \leq \varepsilon$.

Расчетная схема выбора, размещения и определения количества потолочных вентиляторов приведена на рисунке 7 (где r_p – граница расширения струи; D_v – диаметр вентилятора; $2b$ – расстояние между центрами приточных отверстий).

Выводы

- На основе приведенного анализа для описания работы потолочного вентилятора принята модель приточной струи, истекающей из круглого отверстия. Приведены общие аналитические выражения для описания характера распространения компактных свободных и стесненных воздушных струй в помещении.

- Получено аналитическое выражение, которое связывает параметры потолочного вентилятора и характеристику воздушной струи с учетом нормативных значений скорости движения воздуха в рабочей зоне расположения животных.

- Приведены результаты теоретических исследований, показан характер распространения компактных стесненных воздушных струй для сельскохозяйственных помещений с наиболее характерной высотой зданий.

- Приведены расчетные зависимости и рекомендации по определению количества потолочных вентиляторов для выравнивания температуры воздуха по высоте сельскохозяйственного помещения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трунов С.С., Растимешин С.А. Экономия энергии при использовании потолочных вентиляторов в животноводческих помещениях // *Вестник ВИАХ*. 2016. N3(24). С. 35-37. EDN: WWWVCZ.
2. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Trunov S.S. et al. Electric heating system with thermal storage units and ceiling fans for cattle-breeding farms. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. Iss. 11. 1753. DOI: 10.3390/agriculture12111753.
3. Тимошенко В.Н., Петрушко И.С., Музыка А.А. и др. Особенности микроклимата в наиболее распространенных типах животноводческих помещений для содержания коров дойного стада в различные сезоны года // *Научный вестник НУБП. Серия: Технология производства и переработки продукции животноводства*. 2015. N205. С. 388-398. EDN: UMFOVR.
4. Трофимов А.Ф., Музыка А.А., Москалев А.А. Особенности формирования микроклимата животноводческих помещений в зависимости от конструктивных решений // *Вестник национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук*. 2016. N2. С. 80-86. EDN: VZUJXB.
5. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G. et al. Dairy cow behavior is affected by period, time of day and housing. *Animals*. 2022. Vol. 12. Iss. 4. 512. DOI: 10.3390/ani12040512.
6. Flood C.A. jr., Koon J.L., Trumbull R.D., Brewer R.N. Energy savings with ceiling fans in broiler houses. *Applied Engineering in Agriculture*. 1998. Vol. 14. Iss. 3. 305-309. DOI: 10.13031/2013.19382.
7. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Моделирование теплового режима в зоне нахождения поросят при использовании ИК облучательной панели // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2023. Т. 70. N1(50). С. 66-74. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-66-74.
8. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Тепловой режим напольных энергоустановок в зонах содержания молодняка поросят // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N3(44). С. 15-20. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-15-20.
9. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Хименко А.В. Энергосберегающая система отопления с применением электрических тепловых аккумуляторов и потолочных вентиляторов // *Техника и оборудование для села*. 2022. N2(296). С. 34-38. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-2-34-38.
10. Тимошенко В.Н., Музыка А.А., Коронец И.Н. и др. Микроклимат основных технологических зон типовых молочно-товарных ферм и комплексов // *Современные достижения и актуальные проблемы животноводства*. 2023. С. 164-170. EDN: RYATRI.
11. Кирсанов В.В., Довлатов И.М., Комков И.В. и др. Современные подходы к системам обеспечения параметров воздуха в животноводческих помещениях // *Техника и технологии в животноводстве*. 2022. N4(48). С. 61-71. DOI: 10.51794/27132064-2022-4-61.
12. Кирсанов В.В., Баишева Р.А. Контроль и управление в сложной биотехнической системе молочной фермы // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020. Т. 21. N5. С. 625-632. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.5.625-632.
13. Андреев Л.Н., Салмина-Олышко К.Б., Бикчантаева Р.А. Повышение качества макро- и микроклимата животноводческих помещений // *Мир инноваций*. 2018. N1-2. С. 122-127. EDN: URJGWS.
14. Широбокова Т.А., Шувалова Л.А. Энергетический анализ производства продукции животноводства // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. N1(61). С. 72-78. DOI: 10.48012/1817-5457_2020_1_72.
15. Chamberlain A.T. The use of supplementary lighting in dairy cow housing to increase milk production. *Livestock*. 2018. Vol. 23. Iss. 3. 130-138. DOI: 10.12968/live.2018.23.3.130.
16. Hempel S., König M., Janke D. et al. Uncertainty in the measurement of indoor temperature and humidity in naturally ventilated dairy buildings as influenced by measurement technique and data variability. *Biosystems Engineering*. Vol. 166. 58-75. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.11.004.

REFERENCES

1. Trunov S.S., Rastimeshin S.A. Energy savings when using ceiling fans in livestock premises. *Vestnik VIESH*. 2016. Iss. 3(24). 35-37 (In Russian). EDN: WWWVCZ.
2. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Trunov S.S. et al. Electric heating system with thermal storage units and ceiling fans for cattle-breeding farms. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. Iss. 11. 1753 (In English). DOI: 10.3390/agriculture12111753.
3. Timoshenko V., Petrushko I., Muzyka A. et al. Features of microclimate in the most common types of livestock buildings for cattle dairy cattle in different seasons. *Scientific Bulletin NUBiP. Series: Production technology and processing of livestock products*. 2015. Iss. 205. 388-398 (In Russian). EDN: UMFOVR.
4. Trofimov A.F., Muzyka A.A., Moskaliov A.A. Features of formation of microclimate in livestock buildings depending on design. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*. 2016. Iss. 2. 80-86 (In Russian). EDN: VZUJXB.
5. Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G. et al. Dairy Cow Behavior is Affected by Period, Time of Day and Housing. *Animals*. 2022. Vol. 12. Iss. 4. 512 (In English). DOI: 10.3390/ani12040512.
6. Flood C.A. jr., Koon J.L., Trumbull R.D., Brewer R.N. Energy savings with ceiling fans in broiler houses. *Applied Engineering in Agriculture*. 1998. Vol. 14. Iss. 3. 305-309 (In English). DOI: 10.13031/2013.19382.
7. Kuzmichev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Simulation of the thermal mode in the piglets' location area

- when using an IR irradiation panel. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2023. Vol. 70. Iss. 1(50). 66-74 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-66-74.
8. Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Thermal mode of floor power plants in the areas of keeping young piglets. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2021. Vol. 68. Iss. 3(44). 15-20 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-15-20.
 9. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Khimenko A.V. Energy-saving heating system using electric heat accumulators and ceiling fans. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. Iss. 2(296). 34-38 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-2-34-38.
 10. Timoshenko V.N., Muzyka A.A., Koronets I.N. et al. Microclimate of main technological zones of typical dairy farms and complexes. *Modern Achievements and Current Problems of Animal Husbandry*. 2023. 164-170 (In Russian). EDN: RYATRI.
 11. Kirsanov V.V., Dovlatov I.M., Komkov I.V. et al. The modern approaches to livestock premises' air providing systems parameters. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2022. N4(48). 61-71 (In Russian). DOI: 10.51794/27132064-2022-4-61.
 12. Kirsanov V.V., Baisheva R.A. Control and management in a complex biotechnical system of a dairy farm. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020. Vol. 21. Iss. 5. 625-632 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.5.625-632.
 13. Andreev L.N., Salmina-Olshko K.B., Bikchantaeva R.A. Improving the quality of macro- and microclimate of livestock premises (In Russian). *World of Innovation*. 2018. Iss. 1-2. 122-127 (In Russian). EDN: URJGWS.
 14. Shirobokova T.A., Shuvalova L.A. Energy analysis of the livestock production. *Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2020. Iss. 1(61). 72-78 (In Russian). DOI: 10.48012/1817-5457_2020_1_72.
 15. Chamberlain A.T. The use of supplementary lighting in dairy cow housing to increase milk production. *Livestock*. 2018. Vol. 23. Iss. 3. 130-138 (In English). DOI: 10.12968/live.2018.23.3.130.
 16. Hempel S., König M., Janke D. et al. Uncertainty in the measurement of indoor temperature and humidity in naturally ventilated dairy buildings as influenced by measurement technique and data variability. *Biosystems Engineering*. Vol. 166. 58-75 (In English). DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.11.004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Кузьмичев А.В. – анализ научных исследований и литературный обзор, выбор расчетных зависимостей, проведение теоретических исследований;
Тихомиров Д.А. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования; постановка цели и задач исследований;
Хименко А.В. – доработка и оформление текста статьи, анализ расчетных зависимостей, формулирование общих выводов и формирование библиографического списка.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kuzmichev A.V. – analysis of scientific research and literature review, selection of calculated dependencies, theoretical research;
Tikhomirov D.A. – scientific supervision, formulation of key research directions; setting research purpose and objectives;
Khimenko A.V. – revision and formatting of the manuscript text, analysis of calculated dependencies, formulation of general conclusions and formation of the reference list.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

03.12.2024
21.02.2025